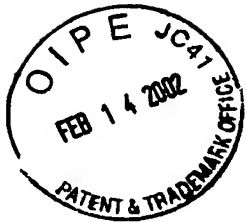


# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

**Aktenzeichen:** 100 54 735.4

**Anmeldetag:** 06. November 2000

**Anmelder/Inhaber:** CeramTec AG Innovative Ceramic Engineering,  
Plochingen/DE

**Bezeichnung:** Außenelektroden für piezokeramische Viel-  
schichtaktoren

**IPC:** H 01 H, H 01 L

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-  
sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 26. November 2001  
**Deutsches Patent- und Markenamt**  
Der Präsident  
Im Auftrag

Dzierzon

### Außenelektroden für piezokeramische Vielschichtaktoren

Piezokeramische Vielschichtaktoren (Fig. 1) bestehen aus gestapelten dünnen Schichten piezoelektrisch aktiven Materials (2), z. B. Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) mit dazwischen angeordneten leitfähigen Innenelektroden (7), die alternierend an die Aktoroberfläche geführt werden. Außenelektroden (3, 4) verbinden diese  
5 Innenelektroden. Dadurch werden die Innenelektroden elektrisch parallel geschaltet und zu zwei Gruppen zusammengefasst, die die beiden Anschlusspole des Aktors darstellen. Legt man eine elektrische Spannung an die Anschlusspole, so wird diese auf alle Innenelektroden parallel übertragen und verursacht ein  
10 elektrisches Feld in allen Schichten aktiven Materials, das sich dadurch mechanisch verformt. Die Summe aller dieser mechanischen Verformungen steht an den Endflächen des Aktors als nutzbare Dehnung (6) und/oder Kraft zur Verfügung.

#### Stand der Technik:

- 15 Piezokeramische Vielschichtaktoren werden nach dem Stand der Technik als Monolithen ausgeführt, das heißt, das aktive Material wird als sogenannte Grün-Folie vor dem Sintern durch ein Siebdruckverfahren mit Innenelektroden versehen, zu Aktorstapeln verpresst, pyrolysiert und dann gesintert, wodurch der monolithische Aktor entsteht.
- 20 Auf den Aktorstapel (1) wird im Bereich der herausgeführten Innenelektroden (7) z. B. durch galvanische Verfahren oder Siebdruck von Metallpaste eine Grundmetallisierung (3) aufgebracht. Diese Grundmetallisierung wird verstärkt durch Aufbringen eines metallischen Werkstoffes (4) z. B. durch Anlöten eines strukturierten Bleches oder eines Drahtnetzes. An diese verstärkte Schicht wird der  
25 elektrische Anschlussdraht (5) gelötet.

Der Aufbau und die Herstellung derartiger Aktoren und Außenelektroden wird ausführlich beschrieben z. B. in DE 33 30538 A1, DE 40 36 287 C2, US 5 281 885, US 4 845 399, US 5 406 164 und JP 07-226541 A.

Derart aufgebaute Aktoren weisen einen gravierenden Nachteil auf: Während  
5 des Betriebes wirken auf den Isolierbereich (11), der unter der Grundmetallisierung (3) liegt, starke Zugspannungen. Da dieser Bereich zusammen mit der Grundmetallisierung und der Lotschicht (8) eine homogene Einheit bildet, versagt diese beim Überschreiten der Zugfestigkeit des schwächsten Gliedes, es bildet sich ein Riss. Die Risse laufen gewöhnlich von der spröden und wenig  
10 zugfesten Grundmetallisierung in die Isolierschicht, und werden dort von Bereichen mit hohen Zugspannungen eingefangen (Elektroden spitze 9), oder sie beginnen in den Bereichen maximaler Zugspannung (9) und laufen Richtung Grundmetallisierung. Mehrere dieser typischen Risse (13, 14) sind in Fig. 3 dargestellt.

15 Die Rissausbreitung (13) entlang einer die Grundmetallisierung berührenden Innenelektrode (10) ist als unkritisch einzustufen, da sie die Funktion des Aktors nicht beeinträchtigt. Risse (14), die unkontrolliert durch die Isolierzone (11) laufen sind dagegen sehr kritisch, da sie den Isolationsabstand verringern und die Wahrscheinlichkeit eines Aktorausfalls durch Überschlüsse stark erhöhen.

20 Problemlösungen werden zum Beispiel in den Patentanmeldungen DE 198 60 001 A1, DE 394 06 19 A1, DE 196 05 214 A1 und anderen beschrieben. Es wird dort vorgeschlagen, den Bereich zwischen einer nicht die Grundmetallisierung berührenden Elektrode (12) und der Grundmetallisierung mit einem Füllmaterial geringer Zugfestigkeit, oder einem Hohlraum zu versehen. Die  
25 wesentlichen Nachteile dieser Vorgehensweise sind darin zu sehen, dass das Füllmaterial mit einem zusätzlichen, komplexen Verfahrensschritt aufgebracht werden muss, das Füllmaterial unvermeidbar die Eigenschaften der Aktors ne-

gativ beeinflusst, und im Falle der eingebrachten Hohlräume diese in einem weiteren Verfahrensschritt vor dem Aufbringen der Grundmetallisierung wieder geschlossen werden müssen.

5 Eine andere Problemlösung wird in DE 199 28 178 A1 vorgeschlagen. Hier wird der monolithische Aufbau in kleine Teilbereiche zerlegt und alternierend mit inaktiven, elektrodenfreien Bereichen wieder aufgebaut. Hierbei soll innerhalb eines aktiven Bereiches die maximal mögliche Zugspannung unterhalb des zur Rissbildung notwendigen Wertes bleiben. Das Verfahren ist fertigungstechnisch schwierig und führt nicht zur notwendigen Reduktion der Spannungen im Bereich 11.

### **Beschreibung der Erfindung**

Es wird vorgeschlagen, die Grundmetallisierung geeignet zu strukturieren (Fig. 4 bis 7), um folgende Effekte zu erzielen:

- 15 1. Durch die Unterbrechung der Grundmetallisierung (3) entstehen freiliegende Bereiche (17) der Aktoroberfläche, an denen eine Wechselwirkung des Lotmetalls mit den nach außen führenden Innenelektroden (10) stattfindet. Dadurch wird in den Außenzonen des Isolierbereichs (11) die Festigkeit entlang der Innenelektroden (10) herabgesetzt und es werden Vorzugsrichtungen für die Rissausbreitung erzeugt.
- 20 2. Durch die Strukturierung der Grundmetallisierung (3) wird die Steifigkeit des Verbundes Keramikoberfläche/Grundmetallisierung/Lot insgesamt herabgesetzt. Dadurch wird die mechanische Rückwirkung der Außenelektrode auf den Aktor und damit auch der Risseintrag verringert ohne die Haftfestigkeit und die sichere Kontaktierung zu gefährden.

Aktoren mit geeignet strukturierter Grundmetallisierung zeigen deshalb ausschließlich Rissbildung entlang der nach außen führenden Innenelektroden (10).

Diese Effekte können im einfachsten Falle dadurch realisiert werden, dass man die für das Lot undurchlässige Grundmetallisierung (3) durch eine geeignete  
5 Strukturierung durchlässig macht, z. B. indem man sie streifen- oder punktförmig ausführt. Beim Lötprozess legiert Metall aus dem Lot mit den Innenelektroden (10) und löst so den gewünschten Effekt aus. Durch die Steuerung von Lötzeit und Löttemperatur kann der Eindringeffekt so eingestellt werden, dass beim  
10 späteren Betrieb des Aktors nahezu jede Innenelektrode (10) zur Leitfläche für einen Riss wird. Das Gefüge der Isolierzone (11) wird dadurch maximal entspannt, die Risse bleiben ungefährlich, es können sich keine Risse mehr bilden, die durch die Keramik laufen.

#### **Vorteil der Erfindung:**

Zur Durchführung im Fertigungsprozess wird kein zusätzlicher Verfahrensschritt  
15 benötigt. Aufgrund der geringen Prozesstemperatur beim Löten wird die Keramik nicht negativ beeinflusst.

#### **Beschreibung des Verfahrens:**

Eine niedrig sinternde Piezokeramik, z. B. SKN53 nach DE 198 40 488 A1 wird mit einem organischen Bindersystem als 125 µm dicke Folie präpariert. Auf die-  
20 se Folie wird Innenelektrodenpaste aus Silber-Palladium Pulver in Gewichtsverhältnis 70/30 und einem geeigneten Bindersystem mittels Siebdruck aufgebracht. Eine Vielzahl derartiger Folien wird gestapelt und zu einem Laminat verpresst. Das Laminat wird zu einzelnen, stabförmigen Aktoren zertrennt, diese werden bei ca. 400 °C pyrolysiert und bei ca. 1100 °C gesintert. Anschließend  
25 werden die Aktorgrundkörper an allen Seiten mechanisch bearbeitet.

Erfindungsgemäß wird die Grundmetallisierung aus z. B. einer geeigneten Silber-Palladium Terminierungspaste mittels eines Siebdruck/Einbrennprozesses aufgebracht, wobei die bedruckten Flächen von unbedruckten Flächen unterbrochen sind (Fig. 4 bis 6). Das entstehende punkt-, linien- oder netzartige Raster soll so fein wie möglich sein, wobei sichergestellt sein muss, dass alle Innenelektroden durch mindestens eine bedruckte Fläche getroffen werden. Hierzu ist es sinnvoll, das Raster unter einem Winkel (18) gegenüber der Richtung der Innenelektroden zu neigen. Wird die Struktur zu fein, so sinkt die Festigkeit des Verbundes zur später aufgelöteten Netzelektrode. Als besonders vorteilhaft für einen Innenelektrodenabstand von 100 µm hat sich ein bedruckter Bereich (16) der Grundmetallisierung von 0,2 - 0,3 mm mit einer gleich großen Unterbrechung (17) erwiesen.

Die strukturierte Grundmetallisierung kann auch auf andere Art und Weise erzeugt werden, zum Beispiel indem man eine ganzflächig aufgetragene Grundmetallisierung überkreuz einsägt oder einritz (Fig. 7) oder indem man die Struktur durch einen elektrochemischen Prozess erzeugt, wobei man die Tatsache nutzt, dass elektrochemisch abgeschiedene Metalle porös sind.

Nach dem Einbrennen der Grundmetallisierung werden die Außenelektroden aus Metaldraht-Netz aufgelötet.

Die Aktoren können nun polarisiert und elektrisch gemessen werden. Das gesamte Vorgehen mit Ausnahme der erfindungsgemäßen Teile ist ausführlich in Patenten und der Literatur beschrieben.

### **Beschreibung der Zeichnungen:**

Figur 1 zeigt schematisch den Aufbau eines monolithischen Vielschichtaktors.

Figur 2 zeigt einen Ausschnitt aus diesen Aktor mit weiteren Details.

Figur 3 zeigt den selben Ausschnitt mit den typischen Rissen, die sich nach ca.  $10^6$  Belastungszyklen einstellen.

Figur 1 bis 3 stellen den Stand der Technik dar.

Figur 4 zeigt eine Grundmetallisierung mit erfindungsgemäßer Struktur aus einzelnen Punkten, die durch Siebdruck einer Terminierungspaste erzeugt wurde.

Figur 5 zeigt eine Grundmetallisierung mit erfindungsgemäßer Struktur aus einzelnen Linien, die durch Siebdruck einer Terminierungspaste erzeugt wurde.

Figur 6 zeigt eine Grundmetallisierung mit erfindungsgemäßer netzartiger Struktur, die durch Siebdruck einer Terminierungspaste erzeugt wurde.

Figur 7 zeigt eine Grundmetallisierung mit erfindungsgemäßer Struktur, die aus einer vollflächig gedruckten Metallisierung durch Sägen herausgearbeitet wurde.

#### **Ausführungsbeispiele: (1 - 5)**

Wie oben ausgeführt werden Aktorgrundkörper der Abmessung  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  (Grundfläche) und 30 mm Länge präpariert. Die Dicke einer Keramikeinzellage 2 beträgt nach dem Sintern  $100 \text{ }\mu\text{m}$ , die Dicke einer Innenmetallisierungsschicht 2  $\mu\text{m}$ . Die Aktorgrundkörper werden wie folgt weiterbehandelt:

1. Die Grundmetallisierung (3) aus einer geeigneten AgPd Terminierungspaste wird mittels Siebdruck aufgebracht, wobei keine Struktur erzeugt wird. Die Schicht ist gleichmäßig dick, die Schichtdicke nach dem Einbrennen bei  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  beträgt  $8 \text{ }\mu\text{m}$ . Die Teile dienen als Referenzmuster und stellen den Stand der Technik dar.

2. Die Grundmetallisierung (3) aus einer geeigneten AgPd Terminierungspaste wird mittels Siebdruck aufgebracht, wobei eine rasterartige Struktur aus runden Punkten erzeugt wird (ähnlich Fig. 4). Der Punktdurchmesser (16) beträgt 0,2 mm, der Freiraum (17) zwischen zwei Punkten ebenfalls 0,2 mm. Das Raster ist unter einem Winkel (18) von 20° zur Richtung der Innenelektroden geneigt, damit alle Innenelektroden (10) durch mindestens einen Rasterpunkt überdeckt werden. Die Schicht der Punkte ist gleichmäßig dick, die Schichtdicke nach dem Einbrennen bei 800 °C beträgt 9 µm.  
5
- 10 3. Die Grundmetallisierung 3 aus einer geeigneten AgPd Terminierungspaste wird mittels Siebdruck aufgebracht, wobei eine linienartige in Aktorlängsrichtung verlaufende Struktur erzeugt wird (ähnlich Fig. 5). Die Linienbreite (16) beträgt 0,2 mm, der Abstand zwischen zwei Linien (17) ebenfalls 0,2 mm. Die Schicht der Linien ist gleichmäßig dick, die Schichtdicke nach dem Einbrennen bei 800 °C beträgt 9 µm.  
15
4. Die Grundmetallisierung (3) aus einer geeigneten AgPd Terminierungspaste wird mittels Siebdruck aufgebracht, wobei keine Struktur erzeugt wird. Die Schicht ist gleichmäßig dick, die Schichtdicke nach dem Einbrennen bei 800 °C beträgt 8 µm. Die Schicht wird nun mittels einer Diamantsäge in 0,2 mm große Quadrate (16) zertrennt, wobei der Abstand (17) der Quadrate 0,1 mm beträgt (Fig. 7). Das Quadrat-Raster ist unter einem Winkel (18) von 35° zur Richtung der Innenelektroden geneigt, damit alle Innenelektroden (10) durch mindestens ein Quadrat überdeckt werden.  
20
5. Die Grundmetallisierung wird elektrochemisch in Form einer Nickelschicht abgeschieden. Die Nickelschicht ist etwa 2 µm dick und wird von einer ebenfalls elektrochemisch abgeschiedenen 0,1 µm dicken Goldschicht überdeckt. Die Goldschicht verbessert die Lötbarkeit und hat keine ande-  
25



re Funktion. Die Nickelschicht ist verfahrensbedingt nicht völlig geschlossen und hat eine feine netzartige Struktur, wobei Durchbrüche in der Größenordnung des Keramikorns (5 - 10  $\mu\text{m}$ ) liegen.

5 Auf die fünf Varianten werden nun mit einem geeigneten Prozess die Außenelektroden (4) aus Drahtnetz aufgelötet. Als Netzmaterial wird ein im thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Keramik angepasstes Material (FeNi36) verwendet, der Drahtdurchmesser beträgt 100  $\mu\text{m}$ , die Maschenweite 200  $\mu\text{m}$ . Das Netz ist galvanisch vorbehandelt (verkupfert) um die Lötbarkeit zu garantieren. Als Lot wird SnAg4 verwendet. Die Lötzeit beträgt 10 Minuten bei 240 °C.

10 Nach dem Löten ist optisch erkennbar, dass bei den Varianten 2 - 5 das Lot die Innenelektroden auch auf den nicht mit Grundmetallisierung versehenen Flächen benetzt hat.

15 Die Aktoren werden nun gereinigt und mit einer geeigneten Lackierung isoliert. Nach dem Anlöten von Anschlussdrähten (5) an die Elektrodenetze (4) werden die Aktoren in Prüfraumen mit 2000 N vorgespannt und mit einem Trapezsignal angesteuert. Dabei wird die Ansteuerspannung in 100  $\mu\text{s}$  von 0 V auf 200 V angehoben, 1 ms auf 200 V gehalten, und dann in 100  $\mu\text{s}$  auf 0 V erniedrigt. Die Wiederholfrequenz ist 200 Hz. Die Aktoren erreichen dabei Betriebstemperaturen von 150 - 160 °C.

20 Die Variante 1 zeigt bereits bei  $10^6$  Zyklen deutliche und starke Rissbildung. Die Risse durchtrennen die Isolierzone (11) in beliebigen Richtungen, Risse entlang der Innenelektroden (10) sind eher selten.

25 Die Varianten 2 und 3 zeigen nahezu identisches Verhalten, das sich von Variante 1 deutlich unterscheidet. Bei  $10^6$  Zyklen tritt kaum sichtbare Rissbildung auf. Bei  $10^7$  Zyklen ist Rissbildung vorhanden. Die Risse laufen alle entlang den

Innenelektroden (10), sind etwa doppelt so häufig wie in Variante 1, und deutlich schwächer ausgeprägt. Auch nach  $10^8$  Zyklen bleibt dieser Zustand unverändert.

Die Variante 4 zeigen das günstigste Rissverhalten. Erst ab  $10^8$  Zyklen tritt deutliche Rissbildung auf. Die Risse laufen ebenfalls alle entlang den Innenelektroden (10). Bei dieser Variante scheren jedoch die Quadrate (19) leicht von der Keramik ab, da der Übergang Grundmetallisierung/Keramik beim Sägeprozess am Rand der Quadrate geschädigt wird.

Die Variante 5 zeigt ein Rissverhalten wie die Varianten 2 und 3, jedoch ist die Haftfestigkeit des Nickels auf der Keramik nicht ausreichend. Es treten nach und nach örtlich Ablösungen der Grundmetallisierung von der Keramik auf, wodurch die Funktion des Aktors bei langen Laufzeiten beeinträchtigt wird.

### Patentansprüche

1. Piezokeramischer Vielschichtaktor mit strukturierter Grundmetallisierung, dadurch gekennzeichnet, dass durch die Unterbrechungen in der Struktur der Grundmetallisierung die Steifigkeit des Verbundes Aktoroberfläche/Grundmetallisierung/Lot herabgesetzt wird, wodurch die Rückwirkung des Verbundes auf die Isolierzone abgeschwächt wird.  
5
2. Piezokeramischer Vielschichtaktor mit strukturierter Grundmetallisierung, dadurch gekennzeichnet, dass durch die Unterbrechungen in der Struktur der Grundmetallisierung Metall aus dem Lot in die Innenelektroden einle-  
10 giert und die Isolierzone an diesen Stellen schwächt, wodurch Vorzugsstellen für die Rissbildung entstehen.
3. Piezokeramischer Vielschichtaktor mit strukturierter Grundmetallisierung, dadurch gekennzeichnet, dass die Grundmetallisierung aus einer  $Ag_xPd_y$  Terminierungspaste erzeugt wird, wobei  $x + y = 1$  und  $1 > x > 0$ , vorzugs-  
15 weise aber  $1 > x > 0,7$ .
4. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur der Grundmetallisierung aus einer geeigneten Terminierungspaste durch ein Druckverfahren erzeugt wird. Vorzugsweise wird als Druckverfahren der Siebdruck eingesetzt.
- 20 5. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur der Grundmetallisierung durch Einsägen oder Einritzen der Struktur in die vollflächig aufgebraachte Grundmetallisierung erfolgt.

6. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur der Grundmetallisierung durch die elektrochemische Abscheidung einer dünnen Nickelschicht erzeugt wird.
7. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur der Grundmetallisierung aus regelmäßig angeordneten Punkten besteht, wobei der Punktdurchmesser 0,5 - 5 Keramiklagendicken entspricht und der minimale Punktabstand ebenfalls 0,5 - 5 Keramiklagendicken beträgt. Vorzugsweise sind der Punktdurchmesser und der Punkteabstand 2 - 3 Lagendicken groß. Das entstehende Raster ist dabei in einem beliebigen Winkel zur Aktorlängsachse geneigt.
8. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur der Grundmetallisierung aus regelmäßig angeordneten parallelen Linien besteht, die einen beliebigen Winkel zur Aktorlängsachse aufweisen können, wobei die Linienbreite 0,5 - 5 Keramiklagendicken entspricht und der Linienabstand ebenfalls 0,5 - 5 Keramiklagendicken entspricht. Vorzugsweise sind die Linienbreite und der Linienabstand 2 - 3 Lagendicken groß.
9. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur der Grundmetallisierung gitternetzartig ist, wobei das Gitternetz in einem beliebigen Winkel zur Aktorlängsachse stehen kann und wobei die Linienbreite der Netzstruktur 0,5 - 5 Keramiklagendicken entspricht und die Linienabstand der Netzstruktur ebenfalls 0,5 - 5 Keramiklagendicken entspricht. Vorzugsweise sind die Linienbreite und der Linienabstand 2 - 3 Lagendicken groß.
10. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach einem der vorhergehenden Ansprüchen, dadurch gekennzeichnet, dass zur Verbindung der Grundmetal-

- 12 -

lisierung mit der Netzelektrode ein Lot eingesetzt wird, das mindestens eines der Metalle Sn, Ag, Cu, Pb, Au, In, Ga aufweist.

11. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach einem der vorhergehenden Ansprüchen, dadurch gekennzeichnet, dass als Lot ein zinnhaltiger Werkstoff verwendet wird, Vorzugsweise SnAg<sub>4</sub> oder SnCu<sub>0,7</sub>.
12. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach einem der vorhergehenden Ansprüchen, dadurch gekennzeichnet, dass zur Verbindung der Grundmetallisierung mit der Netzelektrode ein elektrisch leitfähiger Klebstoff eingesetzt wird.

Fig. 1

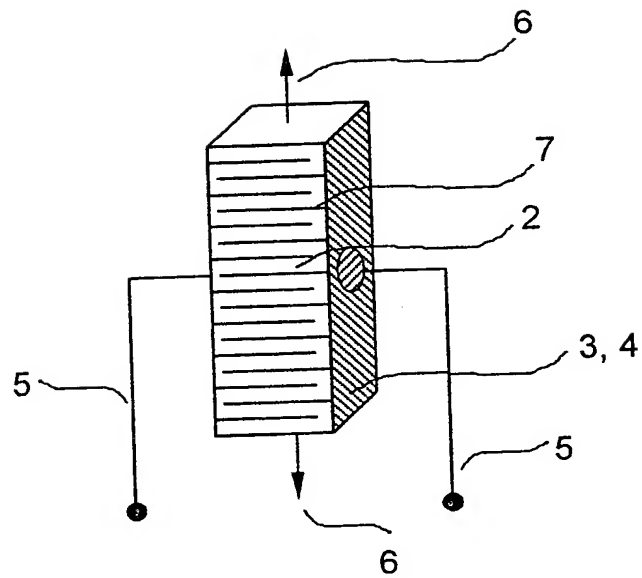


Fig. 2

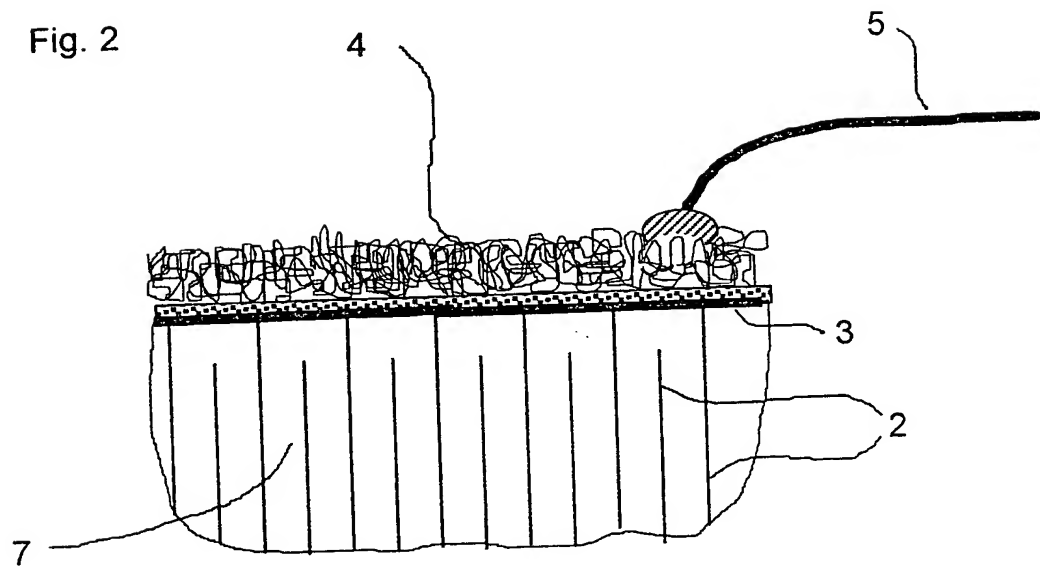


Fig. 3

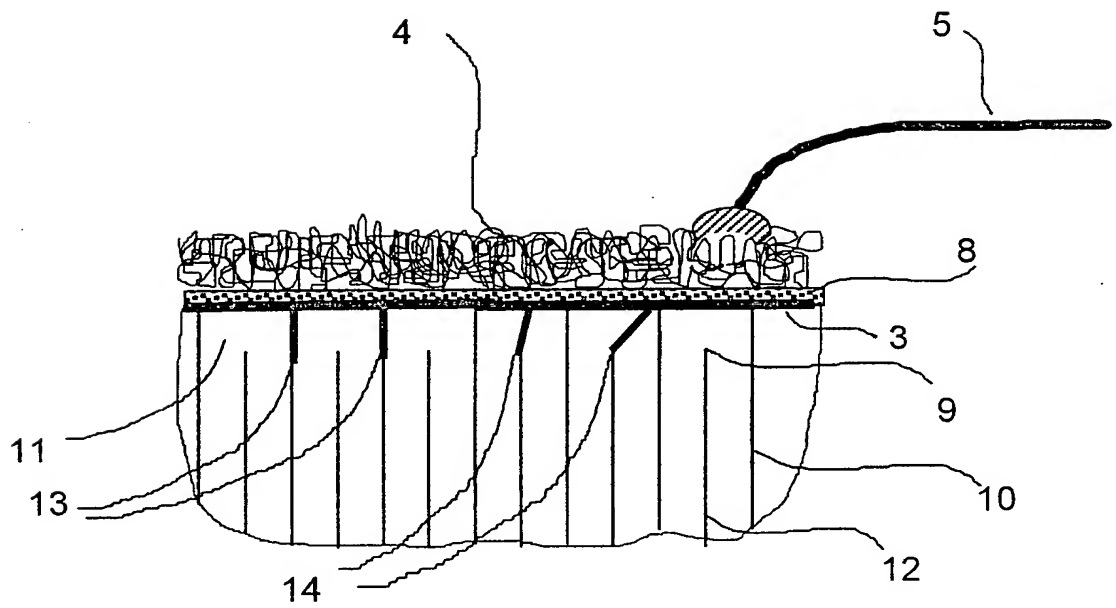


Fig. 4

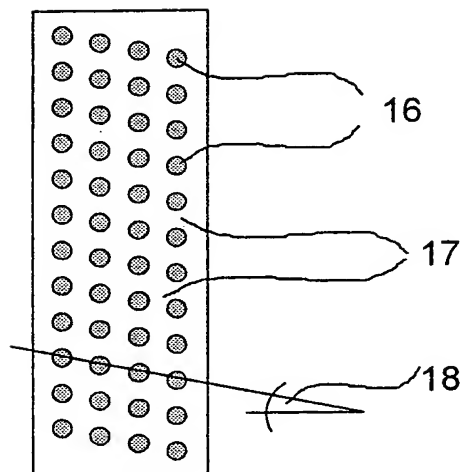


Fig. 5

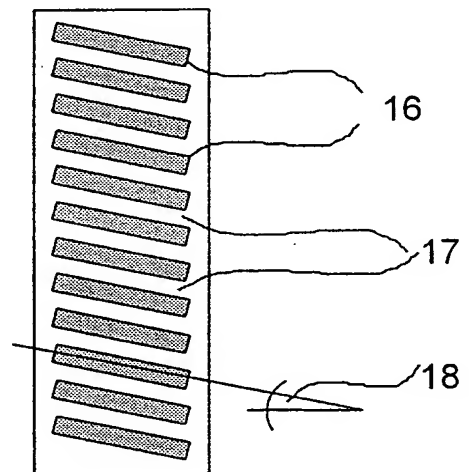


Fig. 6

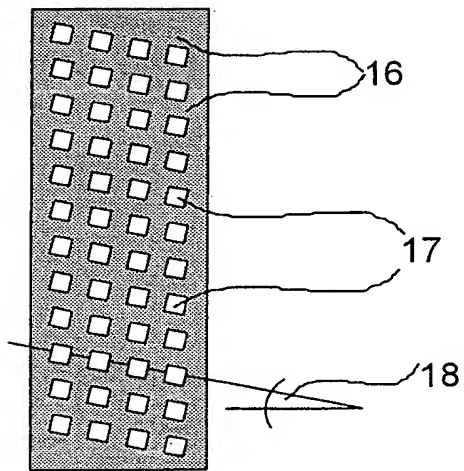


Fig. 7

